

Г.И. КОСТЮК, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;
Ю.В. ШИРОКИЙ, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков.

КОМБИНИРОВАННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И НАНОСТРУКТУРЫ

Показано, що при комбінованому зміцненні реалізується утворення наноструктур, що збільшує мікротвердість до 46 ГПа, стійкість різального інструменту – до 65 разів, зносостійкість деталей – до 60 разів, корозійну стійкість – до 3,7 рази і міцність при втомі – до 1,7 раза. Усе це й особливо збільшення міцності при втомі підтверджує утворення наноструктур при комбінованій обробці.

In article, it is shown that at the combined hardening formation nanostructures is realised that raises microhardness to 46 GPa, firmness of the cutting tool to 65 times, wear resistance of details to 60 times, corrosion firmness to 3,7 times and fatigue durability to 1,7 times. All it and especially increase of fatigue durability confirms formation nanostructures at the combined processing.

Показано, что при комбинированном упрочнении реализуется образование наноструктур, что повышает микротвердость до 46 ГПа, стойкость режущего инструмента – до 65 раз, износостойкость деталей – до 60 раз, коррозионную стойкость – до 3,7 раза и усталостную прочность до 1,7 раза. Все это и особенно повышение усталостной прочности подтверждает образование наноструктур при комбинированной обработке.

1. Введение. На протяжении более 25 лет нами были получены уникальные результаты по повышению стойкости режущего инструмента (РИ) до 20–65 раз, износостойкости деталей – до 18–60 раз, микротвердость достигала 46 ГПа для покрытия $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$, коррозионная стойкость увеличилась в 2–3,7 раза, усталостная прочность – в 1,5–1,7 раза (что особенно удивило оппонентов, так как практически любой вид упрочнения приводит к снижению усталостной прочности) при практическом сохранении шероховатости и геометрии деталей и режущего инструмента (см. обзоры в книгах [1 – 5]). Все это наводило на мысль, что в материале покрытия и даже в основном материале детали или РИ происходят необычные структурные процессы, обеспечивающие такие глобальные изменения.

2. Предпосылки к получению наноструктур при комбинированном упрочнении. Теоретически в работе [6] была рассмотрена возможность получения наноструктур, но не указаны технологические параметры и методы их получения. В работах [6, 7] приведены результаты экспериментов по образованию наноструктур, где показано, что для получения наноструктур необходимы температуры 700...1500 К, скорости нарастания температур более 10^7 К/с, величины давления или температурных напряжений порядка 10^9 Па и наличие атомов катализаторов образования наноструктур. Теоретически предсказано появление наноструктур при комбинированной обработке с использованием ПИО и ИЛО в работе [8], а при использовании ПИО и ЛО – в [9]. Все это требует анализа экспериментальных результатов комбинированного упрочнения.

3. Анализ результатов экспериментальных исследований. Комбинированные технологии обеспечивают создание поверхностных слоев с требуемыми характеристиками. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при плазменно-ионной обработке (ПИО), ионной имплантации (ИИ), лазерной обработке (ЛО) и ряде комбинированных процессов: плазменно-ионной и лазерной обработке (ПИО+ЛО), ионной имплантации и лазерной обработке (ИИ+ЛО) показано на рис. 3. Путем изменения толщины покрытия, использования многослойных покрытий, изменения энергии и сорта ионов при имплантации, плотности энергии и времени воздействия при лазерной обработке можно получить необходимые виды распределения микротвердости в поверхностных слоях толщиной до 1 мм. Это позволяет обеспечить необходимую износостойкость и предел усталостной выносливости за счет создания слоев с остаточными напряжениями сжатия, а также коррозионную устойчивость и другие характеристики детали. Использование лазерной обработки и ионного легирования позволяет производить выборочную обработку отдельных зон детали.

Даны перспективы создания комбинированных технологий, позволяющих повысить стойкость режущего инструмента в 7–37 раз, износостойкость – до 35 раз, коррозионную стойкость – до 5 раз, усталостную прочность – в 1,15–4,5 раза. Разработаны концепции создания конструкций установок для комбинированного проченения и нанесения покрытий

Анализ табл. 1 показывает, что такое существенное повышение стойкости в комбинированной технологии за счет суперпозиции характеристик по стойкости невозможно, а высокие величины повышения свойств связаны с коренным изменением структуры упрочненного РИ.

Таблица 1

Характеристики стойкости

Технология повышения упрочнения	Инструментальные материалы	Вид упрочнения, покрытия	Вид обработки конструкционных материалов	Относительные стойкости конструкционных материалов		
				В исследовании	На производстве	В перспективе
1	2	3	4	5	6	7
Плазменно-ионная обработка инструмента	Твердые сплавы, быстрорежущие стали	Карбиды, нитриды, карбонитриды	Токарная, сверлильная, фрезерная, зубодолбежная	1,5-9	1,1-1,7	2-10
Ионное легирование и имплантация	Твердые сплавы, быстрорежущие стали, Инструментальные стали	Имплантация ионов W, Ti, Zr, C, B, N	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбо-нарезная	1,5-4	1,1-1,6	3-10
	Быстрорежущие стали и инструментальные стали, твердые сплавы	Лазерная закалка	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбо-нарезная	2,1-3,	1,5-2	2,3-4,

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Электронно-лучевая обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Модификация электронным пучком	Токарная, сверлильная	1,4-4	нет	1,7-5
Плазменно-ионная + лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение, лазерная модификация	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	3-11	нет	7-15
Плазменно-ионная обработка + ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и ионное легирование W, Zr, C, B, N, C, B, п.	Покрытие карбиды, нитриды, и карбонитриды	Токарная, фрезерная, сверлильная	4-12	нет	8-21
Плазменно-ионная + Лазерная + ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение ионное легирование и модификация	Точение, сверлильная, фрезерная, резьбонарезная	7-20	нет	10-33
Ионное легирование + лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Ионное легирование и лазерная модификация	Точение, фрезерная, сверлильная	5-15	нет	7-20
Электронная обработка + плазменно-ионная обработка + ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Электронная очистка, плазменно-ионное покрытие + ионное легирование	Точение, фрезерная, сверлильная	7-19	нет	12-25
Электронная обработка + плазменно-ионное покрытие + ионное легирование + лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и лазерная модификация	Электронная очистка, покрытие, ионное легирование	Точение, сверление, фрезерная	8-25	нет	14-37

Сравнение износостойкости, получаемой в индивидуальных технологиях суперпозицией, не дают тех результатов, которые реализуются для комбинированной технологии, а получаются значения намного больше (см. табл. 2).

Коррозионная стойкость (табл. 3) также не может быть объяснена суперпозицией возможностей индивидуальных технологий.

Анализ табл. 4 показывает, что можно повысить усталостную прочность в комбинированной технологии только за счет увеличения энергетического

взаимодействия между зернами наноструктуры, не дающими возможности образования зародышей усталостной трещины, по сравнению с обычными видами упрочнений, которые обычно повышают вероятность появления усталостных трещин, а в лучшем случае сохраняют.

Таблица 2

Сравнение износостойкости

Технология обработки	Материал деталей	Вид покрытия или упрочнения	Повышение износостойкости, раз		
			в исследованиях	на производстве	в перспективе
ПИО	Конструкционные стали и сплавы	Покрyтия: TiN,T, C,MoN,MoC,Cr2N, NbN,WC,B2,Z2O2, HfO2	1,3-6,8	1,25-1,3	1,267
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N+, C+,Ar+,W+,Ae+,B+, Mg+,Cu,Na,Sm	1,2-4	1,2-1,25	1,5-5
ЛО	Конструкционные стали и сплавы	Лазерное упрочнение	1,3-4,3	1,2-1,3	1,4-4,7
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевое упрочнение	1,5	нет	1,7
ПИО+ ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Покрyтие: нитриды, карбиды, имплантация: Mo+,Cu+,N,W, Zr,Ti	2-10	нет	2,5-35
ПИО + ЛО	Конструкционные стали	Покрyтие TiN, Al ₂ O ₃ , лазерное упрочнение	2,3-3	нет	2,8-11
ПИО +ИЛО +ЛО	Конструкционные стали	Покрyтие: TiN,MoN, Al2O3, имплантации B,W,C	5-8	нет	5,5-34
ПИО +ИЛО +ЛО +ЭЛО	Конструкционные стали электронная очистка, лазерное упрочнение	Покрyтие: TiN, MoN, имплантация C ,W	7-10	нет	8-35

Таблица 3

Коррозионная стойкость

Вид обработки	Материал деталей	Вид покрытия	Повышение коррозионной стойкости, раз	
			в исследованиях	на производстве
ПИО	Конструкционные стали и др.	Покрытие TiN, TiN+Al ₂ O ₃ , ZrN	1,2-3	1,1-2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация ионов Fe, Ni, Y, B, C, H и др.	1,3-1,8	1,1-1,3
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевые покрытия из ZrO ₂ +3Y ₂ O ₃	1,2-1,5	1,1-1,2
ЛО	Конструкционные материалы	Лазерное покрытие танталом	1,3-1,6	1,1-1,2
ПИО+ИЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ИЛО-имплантация Y	2-3	нет
ПИО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ЛО-покрытие Ta	2-3	нет
ПИО+ЭЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ЭЛО-покрытие ZrO ₂ +Al ₂ O ₃	2-3,9	нет
ПИО+ИЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al ₂ O ₃ ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta	2,3-4	нет
ПИО+ЭЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие ZrN Al ₂ O ₃ ЭЛО-покрытие ZrO ₂ +Al ₂ O ₃ ЛО-покрытие Ta	2,1 - 3,7	нет
ПИО+ИЛО+ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+TiC ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta ЭЛО-очистка поверхности	2,5-5	нет

Результат проведенного исследования влияния комбинированного упрочнения на повышение стойкости приведен в табл. 5, где рассмотрены такие комбинированные технологии:

– плазменно–ионная (ПИО) и ионно-лучевая (ИЛО)обработка. Видно, что комбинированная обработка (ПИО+ЛО) дает возможности повысить стойкость от 0,5 до 6,25 до 36 раз, причем минимальные значения реализуются при обработке титановых сплавов титаносодержащими покрытиями и ионнолегированными твердыми сплавами. В то же время применение покрытия $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$ и ионное легирование Hf и Zr позволяют обеспечить повышение стойкости до 36 раз при обработке титановых сплавов. Такого повышения стойкости простой суперпозицией свойств плазменно-ионного покрытия (повышение 2,5–3 раза) и ионного легирования (повышение 2,8–3,2 раза) не получили, значит можно ожидать повышения стойкости в 5,1–6,2 раза. Все это говорит, что происходят качественные изменения в поверхностном слое. Ранее нами были предприняты попытки объяснить этот эффект образованием твердых растворов комплексного внедрения. Такого улучшения свойств поверхностного слоя не получили (в этом случае микротвердость поверхности составляла 42 ГПа), что косвенно говорит об образовании наноструктурированных слоев.

Таблица 4

Повышение усталостной прочности

Технология обработки	Материал детали	Вид покрытия или упрочнения	Повышение усталостной прочности, раз		
			в исследованиях	на производстве	в перспективе
ПИО	Конструкционные легированные стали	Покрытие Ni,Cr, Al,Y	1,15-1,2	нет	1,3-2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N	1,12-1,15	нет	1,2-1,8
ЛО	Конструкционные стали	Обработка в режиме с оплавлением	1,1-1,2	нет	1,2-1,9
ПИО	Конструкционные стали	ПИО-покрытие Cr, Ni,Al,Y ИЛО-имплантация	1,3-1,5	нет	1,6-3
ЛО + ПИО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-покрытие Cr,Al,Y	1,25-1,45	нет	1,5-2,5
ЛО+ ПИО+ ИЛО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-покрытие Cr, Ni,Al,Y ИЛО-имплантация N	1,4 -1,7	нет	1,9-4,5

Таблица 5

Стойкость и относительная стойкость РИ с различными видами обработки поверхности

Вид обработки	Материал РИ	V, м/с	h _n , мкм	T _h =0,4 мин	T _н /T _н	$\frac{K_{\text{ПИО+ИЛО}}}{T_{\text{ПИО+ИЛО}}}$ $\frac{K_{\text{ПИО+ИЛО}}}{T_{\text{Mo}_2\text{N}}}$	$\frac{K_{\text{ПИО+ИЛО+ЛО}}}{T_{\text{ПИО+ИЛО+ЛО}}}$ $\frac{K_{\text{ПИО+ИЛО+ЛО}}}{T_{\text{Mo}_2\text{N}}}$	K _{ЛО}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПИО+ИЛО TiN+NiN+AlN+ +Mo ₂ N+ +CrN+SiN Ni ⁺ +Ti ⁺ E _i = 30 кэВ D = 6·10 ²⁰ м ⁻²	BK6+ +TiN+NiN+AlN+ +Mo ₂ N+ +CrN+SiN Ni ⁺ +Ti ⁺ E _i = 30кэВ D= = 6·10 ²⁰ м ⁻²	0,61	2,5	125	6,25	2,5		
			4	157	7,5	2,62		
			5	167	7,6	2,58		
			6,5	183	8,0	2,75		
			7,5	195	8,1	2,77		
			8,6	205	9,3	2,88		
			10	190	9	2,78		
ПИО+ИЛО ZrN+Zr ⁺ E _i =20 кэВ D=7·10 ²⁰ м ⁻²	BK6+ ZrN+Zr ⁺ E _i =20 кэВ D=7·10 ²⁰ м ⁻²	0,61	2,5	210	10,5	4,2		
			4	237	11,3	3,95		
			5	267	12,1	4,1		
			6,5	301	13,1	4,5		
			7,5	365	15	5,14		
			8,6	397	18	5,57		
ПИО+ИЛО 0,8ZrN+ +0,2HfN r ⁺ +Hf ⁺ E _i =2·10 ⁴ кэВ D=7·10 ²⁰ м ⁻²	BK6+ +0,8ZrN+ +0,2HfN+ +Zr ⁺ +Hf ⁺ E _i =20 кэВ D=6·10 ²⁰ м ⁻²	0,61	2,5	373	18,65	7,46		
			4	517	23,7	8,29		
			5	605	27,8	9,42		
			6,5	723	36	12,37		
			7,5	730	30,4	10,41		
			8,6	445	20,2	5,15		
ПИО+ИЛО Al ₂ O ₃ +Al ⁺	P18+ +Al ₂ O ₃ +Al ⁺	0,61	7,5	70	7			
			2,5	192	9,6	2,5	3,84	1,54
			4	238	11,3	2,62	3,95	1,5
			5	246	20,5	2,58	6,95	2,69
			6,5	279	12,1	2,74	4,16	1,52
			7,5	300	12,5	2,51	5,31	2,12
			8,6	340	15,4	2,88	4,77	1,66
			10	380	18,1	2,78	5,57	2
ПИО+ИЛО+ЛО TiN+NiN+AlN+Mo ₂ N+ +CN+SiN Ni ⁺ +Ti ⁺ E _i =30 кэВ D=6·10 ²⁰ м ⁻²	BK6+ +TiN+NiN+ +AlN+Mo ₂ N+ +CN+SiN Ni ⁺ +Ti ⁺ E _i =30 кэВ D=6·10 ²⁰ м ⁻² W _u = 8 Дж	0,61	2,5	192	9,6	2,5	3,84	1,54
			4	238	11,3	2,62	3,95	1,5
			5	246	20,5	2,58	6,95	2,69
			6,5	279	12,1	2,74	4,16	1,52
			7,5	300	12,5	2,51	5,31	2,12
			8,6	340	15,4	2,88	4,77	1,66
			10	380	18,1	2,78	5,57	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПИО+ИЛО+ЛО $ZrN+Zr^{+}$ $E_i=20 \text{ кэВ}$ $D=7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ $W_u = 8 \text{ Дж}$	ВК6+ $+ZrN+Zr^{+}+$ +ЛО $E_i = 20 \text{ кэВ}$ $D = 7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ $W_u = 8 \text{ Дж}$	0,61	2,5	321	16,5	4,2	6,6	1,57
			4	355	17	3,95	5,94	1,5
			5	405	18,2	4,1	6,17	1,5
			6,5	470	20,45	4,5	6,97	1,55
			7,5	530	22,5	5,14	7,71	1,5
			8,6	580	26	5,57	8,05	1,445
			10	620	29,5	5,16	9,1	1,76
ПИО+ИЛО+ЛО $0,8ZrN+$ $+0,2HfN$ $Zr^{+}+Hf^{+}$ $E_i=2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$ $D = 7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$	ВК6+ $+0,8ZrN+$ $+0,2HfN+$ $+Zr^{+}+Hf^{+}+$ +ЛО $E_i = 20 \text{ кэВ}$ $D = 6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$	0,61	2,5	503	25,1	7,46	10,04	1,35
			4	760	36,2	8,29	12,66	1,53
			5	809	37	9,46	12,54	1,33
			6,5	907	39	12,37	13,4	1,08
			7,5	980	40,1	10,41	13,7	1,32
			8,6	1050	48	6,34	14,9	2,35
			10	1090	51,8	6,02	15,98	2,65
ПИО++ИЛО+ЛО $Al_2O_3+Al^{+}+J_{\text{Мод}}$ $E_i=2 \cdot 10^4 \text{ эВ}$ $D=7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$ $W_u=3 \text{ Дж}$	P18+ $+Al_2O_3+$ $+Al^{+}+J_{\text{Мод}}$	0,61	7,5	100	10	2,8		

Этот тезис подтверждается и при объединении в комбинированной обработке ПИО, ИЛО и лазерной обработки (ЛО), где реальным становится повышение стойкости до 51,8 раза (микротвердость поверхности – 46 ГПа, покрытие 0,2HfN+0,8ZrN; ионное легирование Hf^{+} и Zr^{+} и лазерная модификация). Величины повышения стойкости суперпозицией нарастания свойств таковы: (ПИО – 2,3 – 3 раза, ИЛО – 2,8 – 3,2 раза, ЛО – 1,8–2,5 раза); получаем 6, 8–8,7 раза, что намного меньше реально реализуемых. Все это еще раз подтверждает реальность образования наноструктур в этих условиях. Разброс же данных по повышению стойкости связан с недостаточно полным заполнением объема полями температур и температурных напряжений, когда наноструктуры образуются только в части упрочняемого объема. Все это говорит о необходимости решения проблемы заполнения объема полями температур и температурных напряжений, а также подачи иона катализатора для ускорения роста наноструктур.

4. Выводы. Показано, что при комбинированном упрочнении происходят изменения в структуре, приводящие к повышению стойкости режущего инструмента до 65 раз, износостойкости до 60 раз, коррозионной стойкости до 3 раз и усталостной прочности до 1,7 раза. Все эти уникальные свойства не могут быть объяснены суперпозицией повышения свойств за счет индивидуальных технологий, а усталостная прочность обычно после упрочнения снижается. Очевидно, комбинированно упрочненный материал и по своим характери-

кам соответствует наноматериалу, имеющему высокую микротвердость, высокую ударную вязкость, высокое значение коэффициента Пуассона, обеспечивающие высокую работоспособность упрочненного материала РИ.

Нестабильные характеристики комбинированно упрочненного материала можно объяснить недостаточно полным заполнением упрочняемого объема полями температур и температурных напряжений, что приводит к фрагментарному образованию наноструктур.

Доказана возможность получения наноструктур при комбинированном упрочнении.

Список литературы: 1. *Костюк Г.И.* Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Кн. 1 "Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий"/Г.И. Костюк, изд-во АИНУ, 2002. — 588 с. 2. *Костюк Г.И.* Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Кн. 2 "Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования, изд-во АИНУ, 2002. — 486 с. 3. *Костюк Г.И.* Эффективные режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем / Г.И. Костюк. — справочник. Х.:Антиква, 2003, - 412с. 4. *Костюк Г.И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем / Г.И. Костюк. — Монография–справочник. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. — 633 с. 5. *Костюк Г.И.* Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г.И. Костюк. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2006. — 612 с. 6. *Гречихин Л.И.* Физика аночастиц и нанотехнологий. — Мн.: УП «Технопринт», 2000. — 397 с. 7. *Костюк Г.И.* Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г.И. Костюк. — Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. — 406 с. 8. *Костюк Г.И., Бруйка О.О., Суккариех Мустафа Эззат.* Наноструктуры в поверхностном слое детали при комбинированной обработке – действие ионов различных сортов, зарядности и энергий на конструкционные материалы. / Науково-технічний та громадянський часопис Президії Академії інженерних наук України "Вісті" видавн. АИНУ, 1(38)/2009, с. 201–215. 9. *Костюк Г.И., Мелкозерова О.М.* Получение наноструктур в объеме детали при комбинированном упрочнении/ Науково-технічний та громадянський часопис Президії Академії інженерних наук України "Вісті" видавн. АИНУ, 1(38)/2009, с. 12 – 20.

Поступила в редколлегию 06.07.11